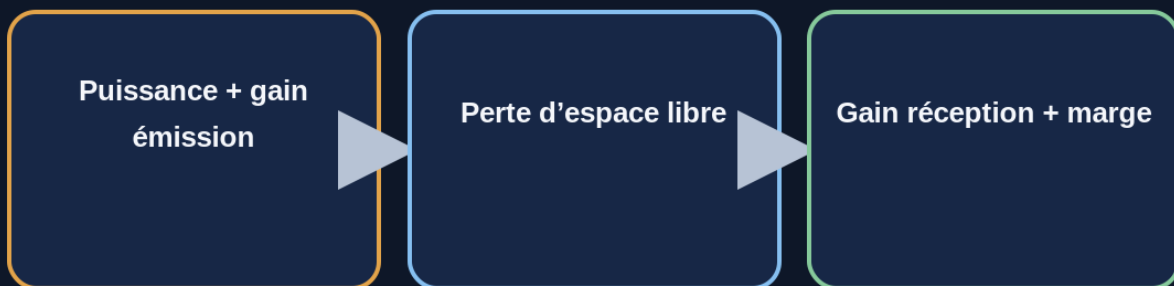


AM-10.03 — Budget de liaison : additionner les gains et les pertes jusqu'au récepteur

Comment savoir avant le vol si le signal reçu après des millions de kilomètres sera encore assez fort pour être décodé ?

AM-10.03 · SPACE ACADEMY

Une comptabilité de gains et de pertes



Delta-Sierra · Space Academy

Le signal s'affaiblit énormément ; le budget vérifie si la chaîne complète reste exploitable.

1 - Comprendre la scène

Une radio martienne peut émettre correctement et pourtant ne rien faire comprendre à la Terre si le signal arrive sous le bruit du récepteur. Le budget de liaison est une comptabilité d'énergie : partir de la puissance émise, ajouter les gains, retrancher les pertes, puis vérifier ce qu'il reste au récepteur avec une marge.

Les ingénieurs utilisent les décibels parce que les rapports sont gigantesques. Au lieu de multiplier et diviser des nombres couvrant des dizaines d'ordres de grandeur, les gains et pertes deviennent des additions et soustractions.

2 - Vocabulaire essentiel

Budget de liaison - Tableau comptable de la puissance depuis l'émetteur jusqu'au récepteur, avec gains, pertes et marge.

Décibel - Unité logarithmique exprimant un rapport. Pour les puissances, $dB = 10 \log_{10}$ du rapport.

dBW - Puissance en décibels par rapport à 1 watt.

dBm - Puissance en décibels par rapport à 1 milliwatt.

Perte d'espace libre - Diminution de densité de puissance liée principalement à l'étalement géométrique de l'onde avec la distance.

Marge de liaison - Écart entre la performance disponible et le minimum requis.

3 - Mécanisme pas à pas

Passer les watts en décibels

1 W = 0 dBW ; 10 W = 10 dBW ; 100 W = 20 dBW. Cette échelle transforme les facteurs dix en pas de 10 dB.

Ajouter le chemin

Une forme simplifiée est : puissance reçue = puissance émise + gain antenne émettrice + gain antenne réceptrice – pertes. Chaque terme est exprimé dans une unité logarithmique compatible.

La distance coûte très cher

En espace libre, doubler la distance augmente la perte d'environ 6 dB, car la densité d'énergie se répartit sur une surface proportionnelle au carré de la distance. C'est pourquoi Mars est un autre monde de télécommunication qu'une liaison locale.

4 - Formules et lecture

$$P_{\text{dBW}} = 10 \log_{10}(P_{\text{W}} / 1 \text{ W})$$

« puissance en dBW égale dix fois le logarithme décimal de la puissance en watts divisée par un watt ».

Cette conversion exprime une puissance absolue sur une échelle logarithmique référencée à 1 W.

$$L_{\text{fs}} = 20 \log_{10}(4\pi d / \lambda)$$

« perte d'espace libre égale vingt fois le logarithme décimal de quatre pi d divisé par lambda ».

Cette formule idéale exprime l'étalement géométrique en fonction de la distance d et de la longueur d'onde λ , dans des unités cohérentes. Elle n'inclut pas toutes les pertes réelles.

$$P_{\text{r}} = P_{\text{t}} + G_{\text{t}} + G_{\text{r}} - L_{\text{total}}$$

« P r égale P t plus G t plus G r moins L total », en décibels compatibles.

Une fois tout exprimé en dB/dBW/dBi de manière cohérente, la comptabilité devient une addition de gains et une soustraction des pertes.

5 - Unités et vérification

Les dB seuls décrivent un rapport ; dBW et dBm décrivent une puissance absolue par référence. Les gains d'antenne sont souvent en dBi. Dans une ligne de budget, on peut additionner une puissance dBW avec des gains/pertes en dB ou dBi parce que ces derniers représentent des rapports, mais il faut savoir ce que chaque colonne signifie.

Ne soustrayez jamais « 200 dB » à « 20 watts ». Convertissez d'abord la puissance dans une référence logarithmique compatible.

6 - Trois démonstrations

Exemple 1 — Convertir 20 W

Convertissons la puissance d'un émetteur pédagogique.

$$\begin{aligned} P_{\text{dBW}} &= 10 \log_{10}(20) \\ \log_{10}(20) &\approx 1.301 \\ P &\approx 13.0 \text{ dBW} \end{aligned}$$

Conclusion: 20 W correspondent à environ 13 dBW.

Exemple 2 — Budget simplifié

Prenons $P_{\text{t}} = 13 \text{ dBW}$, $G_{\text{t}} = 20 \text{ dBi}$, $G_{\text{r}} = 60 \text{ dBi}$ et pertes totales = 250 dB.

$$\begin{aligned} P_{\text{r}} &= 13 + 20 + 60 - 250 \\ P_{\text{r}} &= -157 \text{ dBW} \end{aligned}$$

Conclusion: Le résultat paraît minuscule, ce qui est normal dans une liaison lointaine ; il faut ensuite le comparer à la sensibilité, au bruit, au débit et au codage.

Exemple 3 — Doubler la distance

Comme Lfs contient $20 \log_{10}(d)$, doublons d .

$$\Delta L = 20 \log_{10}(2)$$

$$\log_{10}(2) \approx 0.301$$

$$\Delta L \approx 6.02 \text{ dB}$$

Conclusion: Doubler la distance coûte environ 6 dB de perte supplémentaire en espace libre.

7 - Approfondissement

Le budget ne s'arrête pas à la puissance reçue

Décoder des bits dépend aussi du bruit, de la bande passante, du débit symbole, du codage et du rapport signal/bruit. Une suite de cours devra introduire C/N_0 , E_b/N_0 et taux d'erreur.

Pertes supplémentaires

Câbles, connecteurs, polarisation, pointage imparfait, atmosphère terrestre, pluie selon les fréquences, vieillissement et marge d'implémentation peuvent s'ajouter à la perte idéale.

Pourquoi réduire le débit aide

À puissance reçue donnée, transmettre moins de bits par seconde permet généralement de consacrer plus d'énergie à chaque bit et d'utiliser davantage de redondance de codage, améliorant la robustesse.

Marge comme assurance

Une liaison calculée avec 0,1 dB de marge peut fonctionner sur papier et échouer dès qu'un paramètre réel varie. La marge absorbe incertitudes, dégradations et dispersion de fabrication.

8 - Pourquoi cela compte pour Mars

La distance Terre-Mars varie énormément au fil des orbites ; une liaison doit être conçue pour les géométries défavorables, pas uniquement pour le jour où les planètes sont proches.

Le rôle du DSN, des grandes antennes orbitaires et des relais apparaît naturellement dans le budget : gagner du diamètre d'antenne, du temps d'intégration, du codage ou du gain de réception peut être plus réaliste qu'augmenter brutalement la puissance d'un rover.

9 - Pièges fréquents

- Confondre dB, dBW, dBm et dBi.
- Additionner des watts et des décibels.
- Oublier que Lfs est une perte positive que l'on soustrait au budget.
- Croire que la puissance reçue suffit à prédire le débit sans bruit ni codage.
- Utiliser une distance en km avec λ en m dans une formule sans conversion cohérente.

10 - Exercices guidés

Question: 100 W valent combien de dBW ?

Réponse: $10 \log_{10}(100) = 20 \text{ dBW}$.

Question: Une perte augmente de 6 dB. Quel facteur de puissance cela représente-t-il environ ?

Réponse: En puissance, $+3 \text{ dB} \approx \times 2$; $+6 \text{ dB} \approx \times 4$. Une perte de 6 dB signifie environ quatre fois moins de puissance reçue.

Question: Pourquoi une grande antenne de réception peut-elle compenser une partie de la distance ?

Réponse: Parce que son gain de réception ajoute des dB au budget et collecte davantage efficacement l'énergie venant de la bonne direction.

11 - À savoir expliquer

- Distinguer dB, dBW, dBm et dBi.
- Convertir une puissance simple en dBW.
- Construire un budget Pt + gains – pertes.
- Expliquer pourquoi doubler la distance coûte environ 6 dB en espace libre.
- Définir une marge de liaison et dire pourquoi elle est nécessaire.

12 - Sources NASA / JPL

NASA - Small Spacecraft Communications

<https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/soa-communications/>

NASA - What is the Deep Space Network?

<https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/what-is-the-deep-space-network/>

Ressource pédagogique libre : ce cours explique les principes pour un public débutant. Il ne remplace ni la conception de mission, ni les modèles de vol opérationnels, ni les procédures, essais et validations d'une agence spatiale.